

Soldadura, inspección y verificación, en laboratorio, de un prototipo con chip BGA

Diego Brengi, Salvador Tropea, Matías Parra Visentin, Christian Huy
Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Centro de Electrónica e Informática
Laboratorio de Desarrollo Electrónico con Software Libre
Buenos Aires, Argentina. Email: {brengi,salvador}@inti.gob.ar

Resumen—Este trabajo presenta el procedimiento utilizado para la soldadura e inspección de un chip con encapsulado BGA sin plomo. Se mencionan los criterios considerados para definir el perfil de temperatura y el procedimiento para lograrlo utilizando un equipo de soldadura por infrarrojos. Luego se mencionan las inspecciones realizadas con microscopio, con rayos X, y las pruebas utilizando *boundary scan*.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto FPGALibre[1][2] busca desarrollar y brindar herramientas de software libre y diseños de hardware abierto para trabajar con tecnologías FPGA. Uno de sus objetivos finales es el de crear una plataforma FPGA¹ que pueda alojar un diseño con un procesador LEON3 y un sistema GNU/Linux embebido.

Las capacidades necesarias en la FPGA definen en gran parte el encapsulado a utilizar ya que los fabricantes mantienen una relación entre recursos lógicos y pines de E/S en los modelos ofrecidos al público. Por este motivo, para un sistema con los recursos lógicos necesarios para el proyecto, es casi obligatorio trabajar con encapsulados BGA². Esto obliga también a utilizar un circuito impreso multicapa, ya que de otra forma se hace imposible rutear adecuadamente el sector del BGA donde el espacio es poco y la cantidad de pads y conexiones a realizar es alta. Utilizar un BGA suma además la dificultad de lograr un perfil de temperatura correcto para la soldadura, cuando se utilizan equipos de bajo costo³ y componentes con terminales sin plomo, ya que poseen punto de fusión más alto y entonces los márgenes de temperatura son más ajustados que con la soldadura tradicional con plomo.

Por criterios definidos en el proyecto, se desea además solucionar dentro del país la mayor cantidad de tareas posibles, reducir los costos finales de fabricación cuando sea posible y realizar la experiencia de forma tal que pueda ser documentada y replicada por otros grupos de trabajo, ya que se planea brindar los diseños como Hardware Libre[3] una vez terminado, usando la misma metodología que con la tarjeta s2proto[4].

Para abordar el desafío que presenta la tecnología BGA, como un paso intermedio, se realizó el diseño de una placa

con menores capacidades que las necesarias, pero utilizando el chip FPGA del sistema final en un circuito impreso multicapa.

II. CIRCUITO PROTOTIPO

Explicaremos brevemente las características del circuito prototipo utilizado en la experiencia.

II-A. Características generales

El diseño realizado posee como componente central una FPGA Spartan 3E de Xilinx, modelo XC3S1600E-FGG320, que posee un encapsulado BGA de 320 terminales sin plomo. Este BGA es del tipo *fine-pitch* con espaciado de 1mm entre bolitas, organizadas en una matriz de 18 x 18 terminales, quitando las cuatro centrales. El chip ocupa un área de 19 x 19 mm.

El circuito posee además, dos memorias de configuración, reloj externo, conversor de niveles RS-232 y USB, leds, pulsadores, llaves y conectores para E/S y JTAG⁴. La fuente de alimentación se realiza con un módulo de alimentación separado, diseñado específicamente para este proyecto[5].

II-B. Circuito Impreso

El diseño del circuito impreso se realizó con el software KICAD[6], una herramienta de software libre[7] con licencia GPL. Se utilizaron cuatro capas para rutear adecuadamente la red de alimentación y las señales necesarias para esta aplicación.

Por los criterios de proyecto, mencionados anteriormente, la fabricación del circuito impreso fue encargada a una empresa nacional que realizó todo el proceso de manufactura en el país, llegando al límite de las capacidades actuales en cuanto a tolerancias y distancias mínimas, inevitables en el sector del BGA donde es necesario colocar vías entre los pads del BGA. Se solicitó acabado superficial de níquel oro electrolítico en los pads, para obtener pads bien planos, que no interfieran con el posicionamiento y la soldadura del BGA, ya que el proceso tradicional HASL⁵ no está recomendado para estos casos.

El circuito total resultante posee un área de 7x7 cm.

¹Field Programmable Gate Array.

²Ball Grid Array.

³En comparación a los hornos de producción en serie o sistemas más sofisticados y precisos.

⁴Joint Test Action Group

⁵Hot Air Solder Leveling

III. PERFIL DE TEMPERATURA

III-A. Perfil de temperatura deseado

Para definir el perfil de temperatura ideal para la soldadura del componente, es necesario tener en cuenta varias condiciones[8][9][10]:

- **Punto de fusión:** Es la temperatura donde la aleación deja de ser sólida y pasa directamente a líquida en el caso de aleaciones eutécticas. Para Sn63Pb37 es de 183°C, para Sn95.6Ag3.5Cu0.9[11] de 217°C y para SnAg3.5 de 221°C. En nuestro caso se trata de una aleación de SnAgCu⁶.
- **TAL:** Time Above Liquidus. Es el tiempo durante el cual se supera la temperatura de fusión. Se recomienda un tiempo entre 60 y 150 segundos.
- **PPT:** Package Peak Temp. Es la temperatura medida arriba del encapsulado. No debe superarse para evitar estropear el chip. Es un límite dado por el fabricante del chip y depende del volumen y el grosor del chip. Normalmente está entre 245°C y 260°C. Para nuestro BGA el PPT es de 260°C.
- **SJT:** Solder Joint Temp. Es la temperatura deseada en la junta de soldadura para lograr una correcta unión de soldadura. Importa la mínima necesaria para que se suelde correctamente el BGA. Para SnPb está entre 225°C y 235°C. Y para SnAgCu entre 234°C y 245°C. Se recomienda mantener esta temperatura por lo menos 10 segundos.

El perfil de temperatura debe contemplar las siguientes etapas y condiciones:

- **Precalentamiento:** Es el proceso de precalentamiento de la placa y el chip, antes de acercarse a las temperaturas de activación de flux. Se dan recomendaciones de gradientes máximos de 1°C/s.
- **Activación del flux:** El flux comienza a realizar su trabajo alrededor⁷ de los 150°C, y para cuando lleguemos a los 200°C ya debería haber realizado su función. Los fabricantes recomiendan que se mantenga la placa entre estas dos temperaturas durante 60 a 120 segundos.
- **Reflow:** Es la zona donde ocurre la soldadura.
- **Enfriamiento:** Es la zona siguiente al reflow donde los materiales y componentes vuelven a la temperatura ambiente. Se debe tener cuidado de realizar esta etapa en forma gradual para evitar shock térmico en los componentes y la placa.
- **Ramp-up:** Pendiente de crecimiento. Es la máxima pendiente de crecimiento recomendada para no dañar los materiales, pasadas las etapas de preheat y activación de flux. Se recomienda no superar los 3°C/s.
- **Ramp-down:** Pendiente de caída o enfriamiento. Es la máxima pendiente de enfriamiento recomendada. Si se superan estos valores pueden dañarse los materiales

⁶Hay varias aleaciones SnAgCu con mínimas diferencias en los porcentajes pero poseen similar punto de fusión.

⁷Dependiente del tipo de flux utilizado.

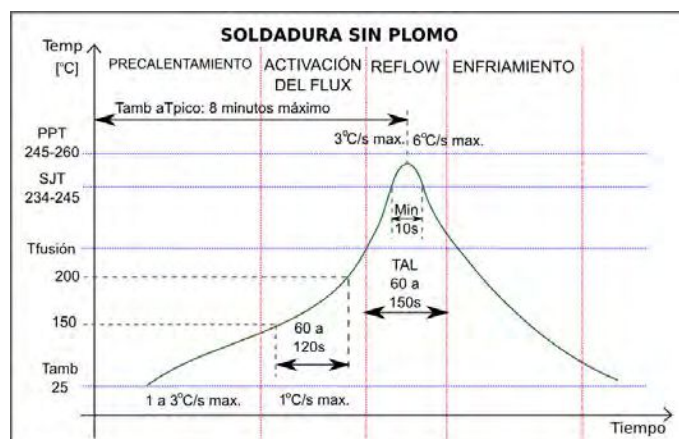


Figura 1. Perfil de temperatura deseado para soldadura sin plomo.

involucrados, principalmente el PCB. Se aconseja no superar los 6°C/s.

Se recomienda además no superar los 8 minutos desde iniciado el proceso de precalentamiento hasta el valor máximo de temperatura. La mayoría de los conceptos y valores mencionados están plasmados en la norma IPC/JEDEC J-STD-020D.1[12]. En la fig.1 se grafican estos conceptos.

III-B. Calibración del perfil

Debido a que el equipo de soldadura utilizado no regula la temperatura aplicada, sino que trabaja a lazo abierto, para lograr los requisitos del perfil fue necesario realizar varias prácticas y ajustar el procedimiento para este caso particular, ya que el perfil obtenido dependerá del equipo de soldadura, el chip y el circuito impreso.

Varias notas de aplicación recomiendan, para definir y calibrar el procedimiento de soldadura, instalar termocupas en varios puntos claves como la superficie de la placa en una zona cercana al BGA, la parte superior del componente BGA, y dos o tres puntos entre el BGA y el PCB, perforando la placa y pasando la termocupas desde abajo hacia arriba.

En nuestro caso se realizaron varias pruebas utilizando un PCB idéntico al del prototipo, un chip BGA similar apoyado sobre el PCB y un registrador de temperatura de hasta 16 canales. Se colocaron tres termocupas, una encima del encapsulado, otra en una zona cercana, y la tercera por debajo del PCB, ésta última para medir la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior. No se realizaron perforaciones en la placa.

IV. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Mencionaremos los equipos utilizados y el procedimiento seguido para realizar la soldadura del dispositivo BGA.

IV-A. Equipos utilizados

- **Estación de soldadura por infrarrojos:** Modelo Jovy RE-7500 (fig.2) con mesa XY para sujeción del PCB. Este equipo posee un calentador inferior y uno superior. El inferior puede usarse en cuatro potencias: Apagado,

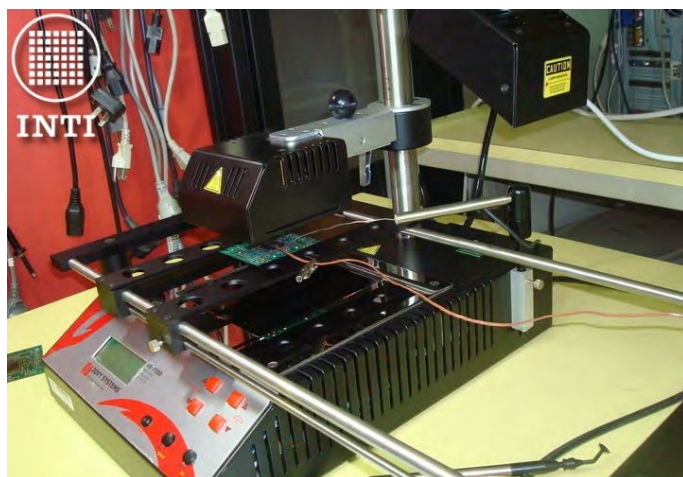


Figura 2. Equipo de soldadura por infrarrojos.

Preheat, Reflow y Fast reflow. El superior puede usarse en *Apagado, Reflow y Fast reflow*. Además este último calentador puede quitarse completamente (*Park mode*) girándolo, dejando de calentar inmediatamente al circuito. En esta posición se puede encender un pequeño ventilador que queda posicionado encima del área de soldadura.

- **Registrador de temperatura:** Se utilizó una PC con una placa de adquisición, termocuplas tipo J y software de registro⁸. Se debe utilizar termocuplas de respuesta rápida (poca masa), y tener cuidado que el extremo de la termocupla no esté soldado con estaño, ya que en ese caso, su respuesta será más lenta al llegar a la temperatura de fundición del estaño.
- **Equipo de inspección:** Luego del proceso de soldadura es conveniente realizar algún tipo de inspección para verificar que las bolitas se han fundido. Existen equipos que realizan inspección lateral, específicos para BGA, que permiten ver bolitas en los niveles internos del BGA. En nuestro caso utilizamos un microscopio digital de propósitos generales, modelo Digimess DMS-133, que nos permitirá observar solamente el nivel exterior, pero que nos dará una idea de como ha resultado el proceso. Este equipo permite una magnificación desde 18.7X hasta 120X.

IV-B. Insumos, accesorios y materiales

- Pinza brusela antiestática, cepillo antiestático y alcohol isopropílico.
- Flux. En nuestro caso hemos utilizado un flux *no-clean*, tipo NC 6-412-A de Norson EFD.
- Pulsera y/o talonera antiestática.
- Pinzas cocodrilo. Para sujetar y posicionar la termocupla.

⁸La estación de soldadura posee una termocupla con visor integrado y software de control y registro, sin embargo presenta varios inconvenientes: alta inercia térmica, alto error de medición en las temperaturas de interés y el software no permite guardar el perfil obtenido en un formato útil para cálculos y análisis posteriores.

- Circuito PCB y componente BGA a soldar.

IV-C. Secuencia realizada para la soldadura del BGA

IV-C1. Preparar el espacio de trabajo: Para comenzar el trabajo, es recomendable apagar aire acondicionado y ventiladores para que no se produzcan fluctuaciones de temperatura. En caso que existieran corrientes de aire colocar paneles que las frenen.

Proveer una buena iluminación sobre el equipo. Ordenar el espacio a utilizar para trabajar cómodos y sin estorbos visuales. Reunir las herramientas y distribuirlas de forma práctica y de fácil acceso. Colocarse la pulsera y/o la talonera antiestática⁹.

IV-C2. Limpiar la placa: Limpiar adherencias o suciedades en los pads de la placa con alcohol isopropílico y el cepillo. Una vez realizada la limpieza, secar con un papel que no deje fibras o restos del mismo.

IV-C3. Aplicar Flux: Aplicar una pequeña cantidad de flux sobre los pads del PCB. Distribuirlo con el pincel antiestático hasta que quede una fina película de flux sobre la placa. Exceso de flux puede ocasionar desplazamientos del BGA al soldarlo. Poco flux puede dificultar que las superficies se suelden adecuadamente.

IV-C4. Posicionar el PCB: Colocar el PCB en la mesa XY y centrarlo. En nuestro equipo, el centro donde se aplica la mayor temperatura está indicado por un puntero láser.

IV-C5. Posicionar el componente: Desplazar la placa mediante los rieles de la mesa XY hacia un lado para poder centrar el componente sin que molesten los cabezales de la soldadora. Esto es necesario ya que la alineación manual del componente requiere observarlo exactamente desde arriba.

Tomar y colocar el componente BGA sobre el PCB con una pinza brusela antiestática o la bomba de vacío de la estación. Centrarlo con respecto a las marcas de la placa. Es muy importante colocar en la serigrafía las marcas de posicionamiento, según las instrucciones de la hoja de datos de nuestro componente BGA a soldar. Utilizar pinza brusela o algún elemento que permita desplazar lateralmente en forma precisa el componente, una vez apoyado el mismo.

IV-C6. Colocar las termocuplas: Fijamos una de las termocuplas, con ayuda de las pinzas cocodrilo, a un lado del componente a soldar, apoyando sobre un pad de cobre expuesto en el PCB. Asegurarse que quede apoyada y haciendo presión sobre el pad. Si disponemos de otra termocupla podemos registrar también la temperatura inferior de la placa.

IV-C7. Registrar la temperatura: Preparar el sistema de registro de temperatura. El sistema debe permitir visualizar a cada momento la temperatura medida, y es aconsejable que los datos se guarden para luego poder analizar el perfil aplicado. Se tomaron mediciones de temperatura cada segundo.

IV-C8. Precalentamiento: Encender la estación y esperar al menos 5 minutos para que se estabilice la temperatura del calentador inferior¹⁰ antes de iniciar el soldado del BGA.

⁹Se recomienda también utilizar un mantel anti-estático para el manejo previo del chip.

¹⁰Instrucciones del fabricante del equipo.

Pasado este tiempo, iniciar el sistema de registro y desplazar la mesa XY hacia el área de soldadura.

IV-C9. Soldar el componente: La secuencia de soldadura es bastante dependiente del equipo utilizado y como se mencionó anteriormente es particular de cada caso y deberá variarse incluso según el chip y el circuito impreso, ya que el equipo utilizado no posee control de temperatura.

Realizamos el soldado del componente con la siguiente secuencia:

- Ponemos la estación con ambos calentadores en *Reflow* y esperamos que la temperatura llegue a 90°C.
- Cambiamos el calentador superior¹¹ a *Fast reflow* hasta 145°C.
- El calentador superior vuelve a *Reflow* y esperamos hasta 200°C.
- El calentador superior pasa a *Fast reflow* hasta llegar a 235°C.
- Apagamos el calentador superior (pero sin girarlo) y continuamos en *Reflow* con el inferior durante 60 segundos.
- Apagamos el calentador inferior y giramos el superior (*Park Mode*) hasta que la temperatura baje a 150°C.
- Encendemos el ventilador del equipo hasta que el PCB se enfríe completamente (aprox. 30°C.).

Como hemos utilizado un flux del tipo *no-clean*, no será necesario limpiarlo (tarea no tan sencilla en un BGA). En este caso, antes de energizar y encender el circuito se aconseja esperar el tiempo necesario para que el SIR¹² del flux no pueda causar un mal funcionamiento del circuito.

V. ANÁLISIS, INSPECCIÓN Y PRUEBAS

Si bien el éxito final de la tarea será el propio dispositivo funcionando satisfactoriamente, lo complejo de todo el proceso hace necesario analizar y verificar el resultado para continuar mejorándolo y detectar errores prematuramente. Esto cobra mayor importancia en los circuitos prototipo donde los problemas por un mal funcionamiento pueden deberse a un error de diseño y no sólo a un mal armado o una mala soldadura.

Se realizan entonces varias pruebas y análisis para detectar posibles errores en el procedimiento de soldadura del BGA.

V-A. Análisis del perfil de temperatura aplicado

Observando el perfil obtenido (ver fig.3, fig.4 y fig.5) vemos que se han superado los 235°C durante 16 segundos, por arriba de 217°C ha permanecido durante 67 segundos, y que la temperatura máxima fue de aproximadamente 241°C.

V-B. Inspección con microscopio digital

No poseemos en el laboratorio un equipo de inspección lateral específico para BGA, con el cual podrían verse defectos de forma, fisuras y cortocircuitos en los niveles internos del BGA. Inspeccionamos entonces las bolitas exteriores con un

¹¹La altura del calentador superior se reguló a 3,25 cm en la escala graduada de la columna de sujeción. La estación posee un mástil con una escala en centímetros que va de 1 a 7,5

¹²Surface Insulation Resistance. Parámetro brindado en hoja de datos del flux.

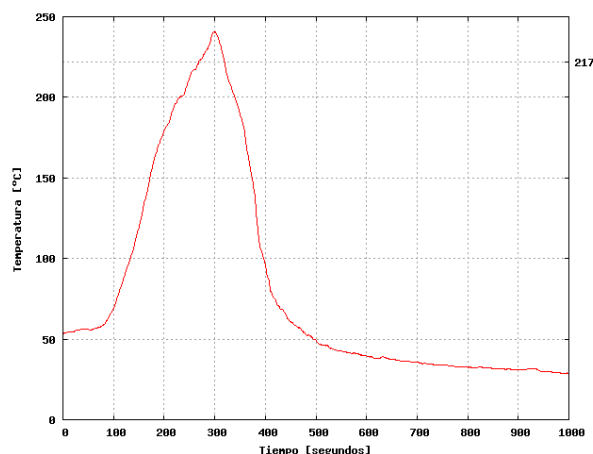


Figura 3. Perfil de temperatura aplicado.

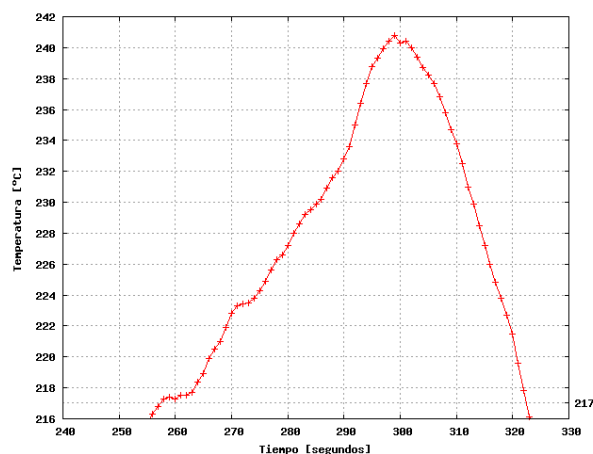


Figura 4. Perfil de temperatura aplicado. Detalle arriba de 217°C.

microscopio digital como se puede observar en la fig.6 y la fig.7. Con este método pueden detectarse problemas de temperatura si las bolitas no han fundido adecuadamente o si se han deformado demasiado por exceso de calor. Será muy difícil detectar errores de alineación o cortocircuitos internos.

Al comparar imágenes de chips correctamente soldados, se debe tener en cuenta que las bolitas sin plomo luego de ser soldadas se ven menos brillosas y menos aplastadas que cuando tienen plomo. En la inspección realizada no se detectaron defectos.

V-C. Inspección con rayos X

La inspección con rayos X puede brindarnos mucha información sobre como ha salido la soldadura del BGA. Mediante este método se hacen evidentes los cortocircuitos, bolitas faltantes, deformadas o con menos estaño, errores de alineación, etc. Sin embargo, el equipamiento para realizar este tipo de inspección es costoso y deben tenerse recaudos especiales por trabajar con radiación.

Se tomaron radiografías en INTI-Mecánica con la siguiente configuración:

- Tubo de rayos modelo PHILIPS MG 225L.

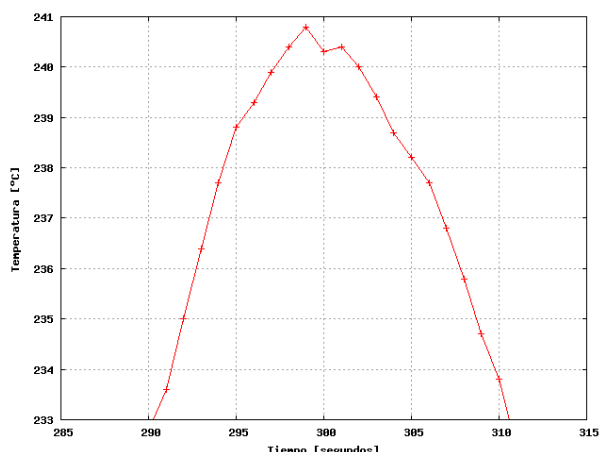


Figura 5. Perfil de temperatura aplicado. Detalle arriba de 235°C.



Figura 6. Microscopio digital utilizado para inspección del nivel exterior.

- I de tubo de 3 mA.
- Potencial ánodo a cátodo de 40 KV(pico).
- Foco de 0,6 x 0,6 mm.
- Película Structurix D3 de 8,9x43 cm, posteriormente digitalizada.
- Distancia del tubo a la placa de 1 m.
- Tiempo de exposición de 8 minutos.
- Pantalla intensificadora posterior de plomo de 300 μ m.
- Filtro de protección para el silicio[13][14] de aluminio¹³ de 2 mm colocado a 4 cm por encima de la placa.
- Reveladora automática GE Nova.
- El circuito se ubicó con el chip hacia la placa radiográfica y el PCB apuntando hacia la fuente de rayos, para minimizar la radiación recibida por el silicio[15].

¹³La mejor alternativa recomendada es una lámina de zinc de 300 μ m

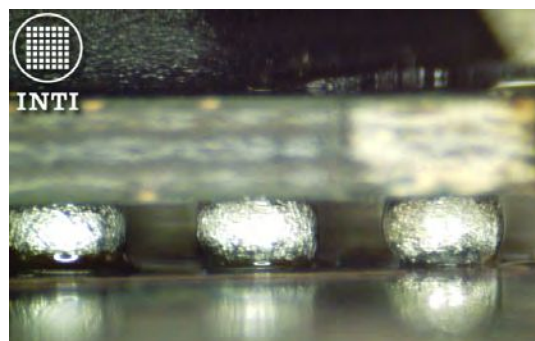


Figura 7. Captura del microscopio, donde se observan las bolitas soldadas.

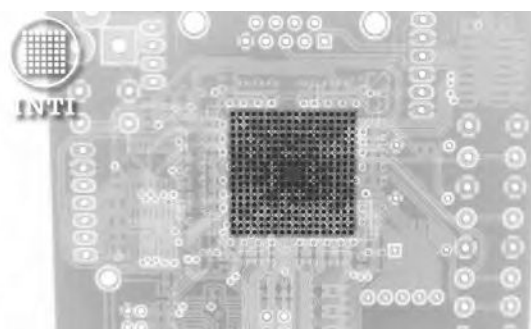


Figura 8. Radiografía del PCB.

- Dosis de radiación estimada: 100 a 130 mRems.

En la radiografía de la fig.9 podemos observar que las bolitas han conservado su forma, no se observan deformaciones ni cortocircuitos evidentes y se encuentra correctamente alineado el BGA con el PCB ya que no se distinguen los pads.

V-D. Pruebas eléctricas mediante boundary scan

Luego de soldar los componentes mínimos de soporte de la FPGA (red de alimentación, puentes de configuración y conector JTAG), podemos comunicarnos con el dispositivo mediante JTAG y utilizar la norma IEEE 1149.1 (*Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture*) para verificar la mayoría de los pads del dispositivo. Por supuesto será necesario que por lo menos estén correctamente soldados y sin cortocircuitos los pads de alimentación y del puerto JTAG.

Para estas pruebas utilizamos el software GNU JTAG[16], agregando el soporte correspondiente para nuestro dispositivo, y usando el hardware del proyecto FPGALibre.

El testeo básico implica conmutar un pad y medir con un voltímetro en alguna parte del PCB donde pueda accederse con una punta de prueba, normalmente en el extremo opuesto del pad BGA. Presentamos a continuación un ejemplo simple de testeo:

```
jtag> cable ppdev /dev/parport0 DLC5
Initializing Xilinx DLC5 JTAG Parallel...
jtag> detect
IR length: 22
Chain length: 1
DeviceId: 00100001110000111010000010010011
Manufacturer:Xilinx
Part: xc3s1600e
Stepping: 2
Filename: /usr/./xc3s1600e/xc3s1600e
```

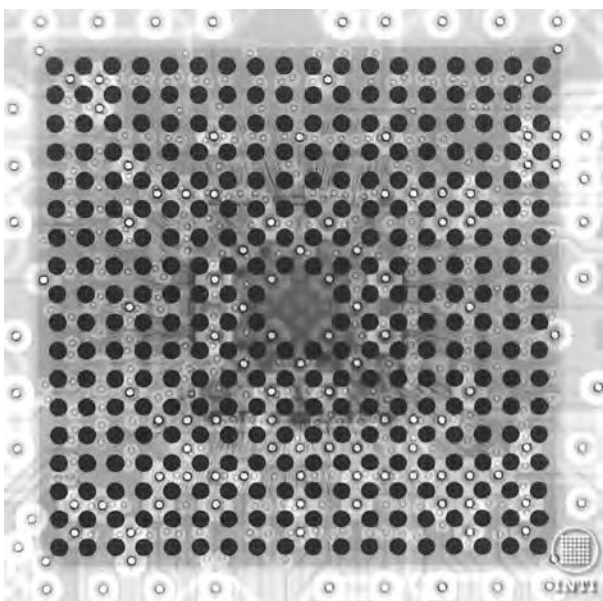


Figura 9. Radiografía del PCB. Detalle del BGA.



Figura 10. Circuito final en funcionamiento.

```
jtag> part 0
jtag> instruction EXTEST
jtag> shift ir
jtag> set signal PAD297 out 0
jtag> shift dr
jtag> set signal PAD297 out 1
jtag> shift dr
```

Las pruebas con el JTAG resultaron exitosas.

VI. CONCLUSIONES

Se ha realizado exitosamente la utilización de un dispositivo BGA, comenzando con la etapa de diseño del PCB, pasando por la soldadura del mismo en las instalaciones del laboratorio y terminando con la verificación y puesta en marcha. Pasar por este proceso brinda una visión más amplia sobre el trabajo con encapsulados BGA y soldadura sin plomo, a la vez que ayuda a mejorar los criterios de diseño, incluso si posteriormente se decide tercerizar la soldadura y verificación.

Poseer estas capacidades de equipamiento y de recursos humanos en el laboratorio también brinda mayor flexibilidad a

la hora de trabajar con circuitos prototipos en pocas unidades. Según los objetivos del proyecto, se espera además que la documentación del proceso ayude a cualquier interesado en la utilización de dispositivos BGA cuando las necesidades de diseño lo justifiquen.

VII. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a J. P. Laurino de la empresa Inarci S.A. por la buena atención recibida, a S. Guberman de la firma Electrocomponentes S.A. por brindarnos la muestra del flux para BGA, y muy especialmente a William Crease de INTI-Mecánica por las imágenes radiográficas.

REFERENCIAS

- [1] INTI Electrónica e Informática *et al.*, "Proyecto FPGA Libre," <http://fpgalibre.sourceforge.net/>.
- [2] S. E. Tropea, D. J. Brengi, and J. P. D. Borgna, "FPGALibre: Herramientas de software libre para diseño con FPGAs," in *FPGA Based Systems*. Mar del Plata: Surlabs Project, II SPL, 2006, pp. 173–180.
- [3] I. González, J. González, and F. Gómez-Arribas, "hardware libre: clasificación y desarrollo de hardware reconfigurable en entornos gnu/linux," <http://www.icearobotics.com/personal/juan/publicaciones/art4/hardware-libre.pdf>.
- [4] D. J. Brengi, S. E. Tropea, and J. P. D. Borgna, "Tarjeta de diseño abierto para desarrollo y educación," in *2007 3rd Southern Conference on Programmable Logic Designer Forum Proceedings*, Mar del Plata, 2007, pp. 57–60.
- [5] C. Huy and D. Brengi, "Módulo de alimentación para placas con dispositivos FPGA," in *Congreso de Microelectrónica Aplicada, uEA2010*. San Justo, Buenos Aires: Universidad Nacional de La Matanza, 2010, p. 21. [Online]. Available: http://utic.inti.gob.ar/publicaciones/uEA2010/uea2010_submission_49.pdf
- [6] J.-P. Charras, "Kicad: GPL PCB Suite," http://www.lis.inpg.fr/realise_au_lis/kicad.
- [7] Free Software Foundation, Inc., "The Free Software Definition," <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>.
- [8] (2006, Jul.) General Soldering Temperature Process Guidelines, Solder Joint and Package Temperature for Pb-free BGA in SnPb and Pb-free Solders in IR or Convection Reflow, Application Note: AN3300. Freescale Semiconductor. [Online]. Available: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN3300.pdf
- [9] M. Lee. (2010, Feb.) Implementation and Solder Reflow Guidelines for Pb-Free Packages, Application note, XAPP427 (v2.5). Xilinx. [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp427.pdf
- [10] (2010, Sep.) Device Package User Guide, Chapter 7, Reflow Soldering Process Guidelines, User guide UG112 (v3.6). Xilinx. [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug112.pdf
- [11] (2011, Jun.) Solder. Wikipedia. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solder>
- [12] (2008, Mar.) Moisture/reflow sensitivity classification for nonhermetic solid state surface mount devices, IPC/JEDEC J-STD-020D.1. IPC and JEDEC Solid State Technology Association. [Online]. Available: <http://www.ipc.org/TOC/J-STD-020D-1.pdf>
- [13] R. Blish. (2008, Oct.) Impact of X-Ray inspection on spansion flash memory, Application note, rev 1. Spansion. [Online]. Available: http://www.spansion.com/Support/AppNotes/X-ray_inspection_on_flash_AN_01_e.pdf
- [14] R. Blish II, S. X. Li, and D. Lehtonen, "Filter optimization for x-ray inspection of surface-mounted ics," in *IEEE Transactions on device and materials reliability*, vol. 2, no. 4, Dec 2002. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1176469
- [15] R. C. Blish II, S. X. Li, D. S. Lehtonenand, C. J. Black, and D. C. Darling, "Prevention of parametric or functional changes to silicon semiconductor device properties during x-ray inspection. United States Patent 6751294," <http://www.freepatentsonline.com/6751294.html>, AMD, Advanced Micro Devices (Sunnyvale, CA).
- [16] (2003, Oct.) Openwinced GNU JTAG Tools. [Online]. Available: <http://openwinced.sourceforge.net/jtag/>